



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1427–1432



COMPTES RENDUS

GEOSCIENCE

<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géophysique interne (Géophysique appliquée)

Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin des Triffa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques

Driss Khattach ^{a,*}, Pierre Keating ^b, El Mostafa Mili ^a, Touria Chennouf ^a,
Pierre Andrieux ^c, Abdellah Milhi ^d

^a Laboratoire « Géophysique, Géodynamique et Géoressources » (L3G), faculté des sciences, BP524, Oujda, Maroc

^b Commission géologique du Canada, Ottawa

^c Département de géophysique appliquée, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^d Centre régional de géologie, Oujda, Maroc

Reçu le 24 avril 2004 ; accepté après révision le 28 septembre 2004

Disponible sur Internet le 6 novembre 2004

Présenté par Xavier Le Pichon

Résumé

Différentes techniques (gradient vertical, gradient horizontal, prolongement vers le haut, déconvolution d'Euler) ont été appliquées à la carte gravimétrique de la plaine des Triffa et du flanc nord des Béni-Snassen en vue de mettre en évidence les différentes structures géologiques (failles, bassins) présentes dans le secteur. Les résultats obtenus ont permis de dresser une carte structurale présentant le système de failles responsable de la structuration de la zone d'étude. Cette carte constitue un document très utile pour orienter les recherches hydrogéologiques futures qui seront menées dans le secteur d'étude. **Pour citer cet article : D. Khattach et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Contribution of gravimetry to the study of Triffa basin structure (north-eastern Morocco): hydrogeological implications. Various techniques (horizontal and vertical derivatives, upward continuation, Euler deconvolution) have been applied to the gravity data from the Triffa's plain and the north flank of the Beni-Snassen massif to delineate various major geological structures such as faults and basins. These results allow the production of a structural map showing the fault systems for the survey area. This map forms the basis for planning future hydrogeological research in this region. **To cite this article: D. Khattach et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Triffa ; gravimétrie ; filtrage ; structure ; hydrogéologie ; Maroc

Keywords: Triffa; gravimetry; filtrage; structure; hydrogeology; Morocco

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : khattach@sciences.univ-oujda.ac.ma (D. Khattach).

Abridged English version

Northeastern Morocco (Fig. 1) is characterised by a Mediterranean semi-arid climate with irregular annual rainfalls and long dry periods. Use of groundwater is increasing in order to meet the demand for domestic, agricultural, and industrial needs. The study area can be subdivided into two hydrogeological domains [3, 5]. First, the Triffa plain, with an aquifer composed of Quaternary deposits in the southern part and of limestone and marl of Villafranchian age in the northern part. Secondly, the northern flank of the Beni-Snassen Mountains, where Jurassic limestones and dolomites host a deeper aquifer. Negative results from a deep (~1300 m) hydrogeological borehole led us to undertake this study to increase our understanding of the deep geological structure of the area. Gravimetry was used to map the 3D distribution of density contrasts due to basins and faults.

Inspection of the Bouguer anomaly map of the study area (Fig. 2) shows that there are three major zones of anomalies extending in an ENE direction: two gravity highs, associated with an uplift of the Palaeozoic basement in the Beni-Snassen and Kebdana belts, and a gravity low over the Triffa depression.

These zones are bounded by strong gravity gradients. Various techniques, such as vertical and horizontal derivatives, Euler deconvolution, and upward continuations were used to interpret the gravity map [1,2,6]. The first vertical derivative enhances short wavelength anomalies, therefore attenuating or minimising the effect of the regional gravity field. The resulting map (Fig. 3) shows some well-defined structures. For example, it allows us to identify, in the northern part, two small gravity lows (B1 and B2). Euler deconvolution was used to determine source depths and locations. Solutions are well grouped and correlate with faults defining these two depressions or basins (Fig. 3).

The gravity field above the vertical contact between rocks of different densities shows a low on the side of the low-density rocks and a high on the side of the high-density rocks. The inflection point is located just above the contact. The location of the maximum of the horizontal gradient outlines the contact. In the case of a dipping contact, the maximum stays close to the contact, but moves in the down dip direction [6].

Maxima from the horizontal derivative of the Bouguer anomaly and its upward continuation at several heights, up to 3000 m, are shown in Fig. 4. They show alignments outlining the contacts. In the case of a dipping contact, the maximums move down dip with increasing continuation height. These contacts, interpreted as faults, are plotted and statistically analysed (Fig. 5). The rose diagram indicates four major fault patterns (N50°, N65°, N85° and directions between N110° and 160°), which confirm those obtained from previous structural studies in northeastern Morocco ([7] and references cited).

The resulting structural map explains some hydrogeological problems: (1) the change of direction of groundwater flow from north–south to north–west in the Madagh and Laatmana regions; (2) the high salinity of the groundwater (up to 11 g l⁻¹) in the northern part, particularly in depression B (Fig. 3). These strong concentrations could be due to weak dilution by the less mineralised water and contact with Pliocene marls.

Results from this work show the importance of using various filtering and interpretation techniques in the analysis of gravity data. They also provide new insights into the structure of the study area, particularly in the northern part. The structural map is a very useful document in the planning of hydrogeological research to be undertaken in the study area.

1. Introduction

La plaine des Triffa et le flanc nord des Beni-Snassen renferment des nappes d'eau superficielles et profondes, qui constituent un facteur déterminant pour le développement socio-économique de cette région. Les nappes superficielles sont généralement soumises à un rythme d'exploitation élevé et présentent une grande vulnérabilité à la pollution et à la sécheresse, et beaucoup d'entre elles sont affectées par la salinité; de ce fait, la prospection hydrogéologique s'est résolument orientée vers les nappes profondes. Cependant, des forages profonds se sont avérés négatifs, d'où la nécessité d'entreprendre des études approfondies en vue de mieux cerner la structure de la zone d'étude.

La région d'étude a fait l'objet, depuis plusieurs décennies, de campagnes de reconnaissance directe par forages, ou indirecte par les méthodes de la géophy-

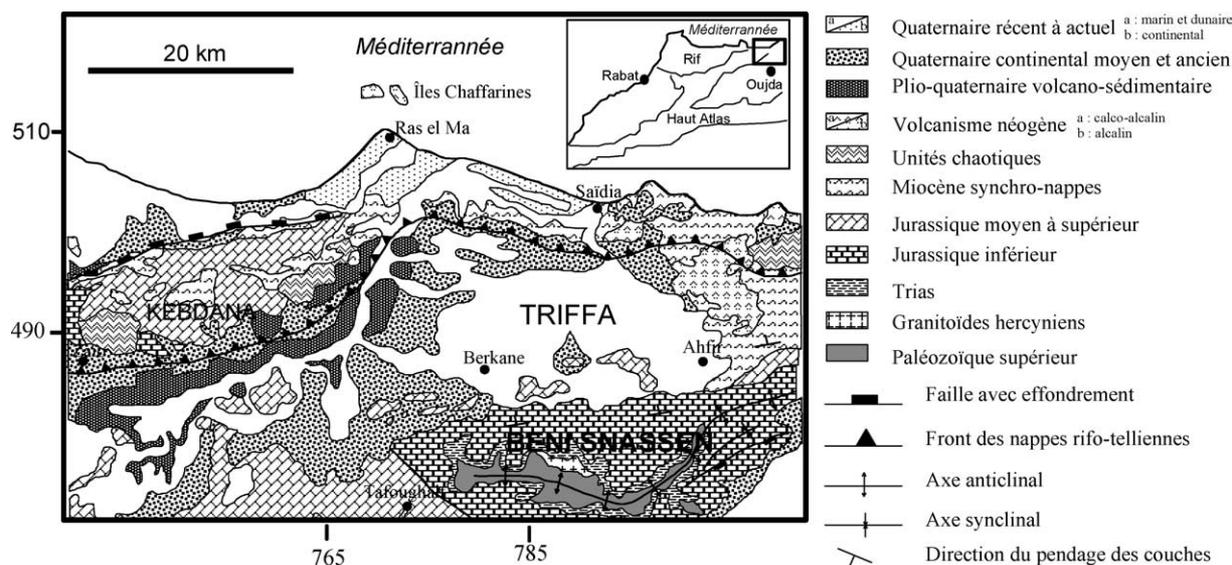


Fig. 1. Schéma structural du Maroc nord-oriental.

Fig. 1. Structural map of northeastern Morocco.

sique. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé, comme outil d'investigation, la gravimétrie. Les résultats de différents filtrages appliqués à la carte des anomalies de Bouguer ont permis de mieux comprendre la structure de la zone d'étude.

2. Contexte géologique et hydrogéologique

La plaine des Triffa (Fig. 1) constitue une vaste dépression remplie de sédiments néogènes et quaternaires. Elle est encadrée par le massif des Béni-Snassen au sud, le horst miocène de Ouled Mansour au nord et le massif des Kébdana au nord-ouest.

De point de vue hydrogéologique, on distingue deux domaines [3,5] :

- la plaine des Triffa loge une nappe phréatique, dont le plancher imperméable est vraisemblablement constitué par les marnes pliocènes, alors que les terrains aquifères sont constitués par des dépôts quaternaires à sédimentation continentale. Ces dépôts ont une perméabilité très variable et sont parfois pratiquement imperméables. Dans la partie nord, au nord de Madagh, le réservoir est constitué par les calcaires lacustres marneux, peu fissurés et de faible perméabilité. La direction

générale d'écoulement des eaux souterraines est sud-nord, puis, en s'approchant de la flexure de Hassi-Smia, devient SE-NW. Les concentrations en sel des eaux de la nappe phréatique varient entre 0,5 et 11 g l⁻¹. Les eaux à salinité élevée se rencontrent dans la partie nord de la plaine (au nord de la flexure de Hassi-Smia) ;

- le flanc nord des Béni-Snassen, grâce aux calcaires et dolomies karstiques du Jurassique, renferme une nappe profonde en charge, avec écoulement vers le nord.

3. Les résultats du filtrage des anomalies gravimétriques

3.1. Données

La carte gravimétrique de la région d'étude (anomalie de Bouguer, $d = 2,2 \text{ g cm}^{-3}$) a été établie à partir de 1160 stations de mesure (Fig. 2). Cette carte reflète les variations latérales de la densité dans le sous-sol et montre les traits principaux suivants :

- une anomalie allongée ENE–WSW, encadrée par Berkane, Ahfir, Madagh et Lâatamna, qui corres-

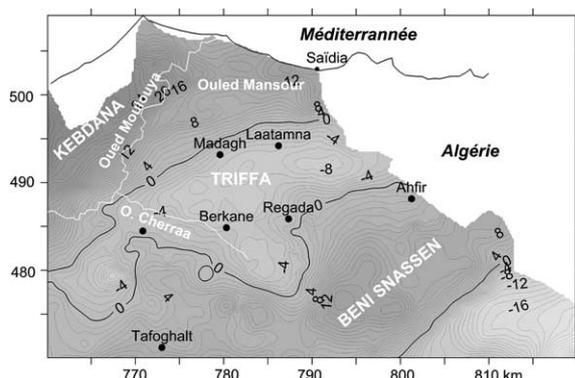


Fig. 2. Carte gravimétrique de la zone d'étude (anomalies de Bouguer, densité de correction $d = 2,2 \text{ g m}^{-3}$). Intervalle = 1 mGal).

Fig. 2. Bouguer anomaly map (reduction density: 2.2 g cm^{-3}). Minimum contouring interval is 1 mGal.

pond à la dépression des Triffa remplie par des sédiments néogènes et quaternaires. De forts gradients délimitent cette dépression, au nord comme au sud ;

- une petite anomalie négative, de direction NW–SE, située au sud-est de Berkane ; elle correspond vraisemblablement à une petite dépression ;
- le massif des Béni-Snassen, caractérisé par un ensemble d'anomalies positives orientées ENE–WSW, qui sont dues aux terrains primaires qui affleurent dans la partie la plus élevée du massif et qui sont entourées par des terrains triasiques et jurassiques. Sa limite sud présente un fort gradient ;
- le passage au massif des Kibdana, au nord, qui se traduit par un fort gradient NE–SW, au niveau de Oued Moulouya.

4. Méthodes

La carte classique des anomalies de Bouguer n'apporte pas suffisamment d'éléments ; cependant, elle contient des informations comme l'amplitude des gradients horizontaux présents entre les anomalies ou encore des anomalies de faible amplitude, souvent masquées par des anomalies régionales. Quatre outils se sont avérés utiles pour traiter cette carte : le gradient vertical, le gradient horizontal, le prolongement vers le haut et la déconvolution d'Euler.

Les forts contrastes que montrent les données gravimétriques sont supposés résulter de discontinuités

ou interfaces telles que les failles, les flexures, les contrastes des roches intrusives, etc. Les méthodes utilisées pour l'analyse des contacts sont la déconvolution d'Euler [6] et le gradient horizontal couplé avec le prolongement vers le haut [1]. La première technique permet, en plus de la localisation dans le plan horizontal des contacts, une estimation de leur profondeur. Le champ gravimétrique au-dessus d'un contact vertical mettant en présence des roches de densités différentes est matérialisé par un bas du côté des roches de faible densité et par un haut du côté des roches de haute densité. Le point d'inflexion se trouvera à l'aplomb de ce contact vertical. On peut se servir de cette caractéristique des anomalies gravimétriques pour localiser les changements abrupts de densité [2,4]. Si le contact présente un pendage, les maxima des gradients horizontaux se déplacent du côté du pendage, mais ceux-ci resteront cependant près de ce contact pour des valeurs de pendage élevées.

Pour déterminer le sens du pendage des différents contacts, la carte de Bouguer a été prolongée vers le haut jusqu'à 3000 m, par étapes de 250 m. À chaque niveau, les maxima du gradient horizontal ont été localisés. En principe, les niveaux de prolongement les plus élevés correspondent aux contacts les plus profonds et vice-versa. Si les structures sont verticales, tous les maxima se superposent. En revanche le déplacement des maxima avec le prolongement vers le haut indique le sens du pendage.

5. Résultats

Le premier résultat est la mise en évidence, par le gradient vertical (Fig. 3), de deux petits bassins B1 et B2, de forme losangique et situés entre la Moulouya et l'axe Madagh–Laalamna. Les solutions d'Euler pour l'indice structural $IS = 0$ indiquent que ces deux bassins sont délimités par des failles de direction NE–SW et est–ouest, avec des profondeurs qui peuvent atteindre 4 km.

La superposition des maxima du gradient horizontal, déterminés sur la carte de Bouguer et sur les cartes prolongées vers le haut, souligne les différents contacts et indique leur pendage (Fig. 4). La numérisation et le traitement statistique des contacts, interprétés comme étant des failles (Fig. 5), révèlent l'existence de quatre familles de directions : N50, N65, N85 et

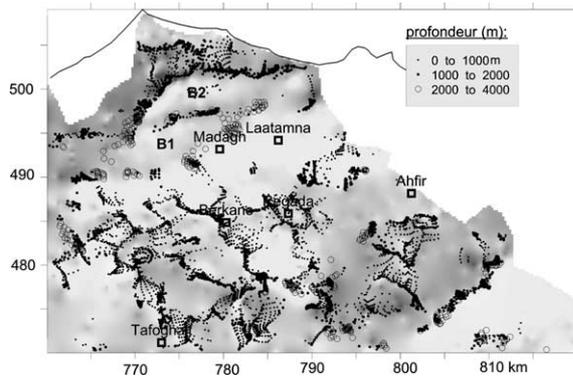


Fig. 3. Carte du gradient vertical et les solutions d'Euler pour l'indice structural $IS = 0$, une fenêtre de 10×10 et une erreur relative maximale de 15%.

Fig. 3. First vertical derivative of the Bouguer anomaly and Euler solutions for a structural index of zero, a 10×10 window and a maximum relative error of 15%.

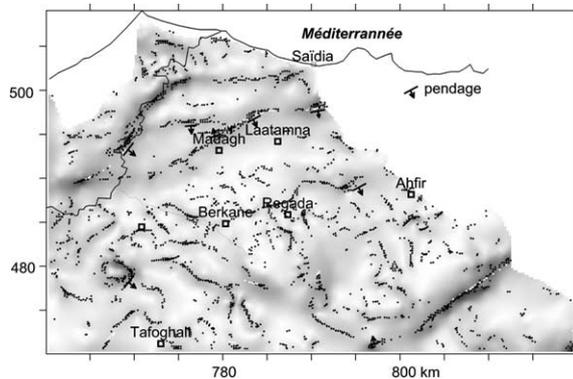


Fig. 4. Localisation des maxima du gradient horizontal obtenus sur l'anomalie de Bouguer et carte prolongée vers le haut à différentes altitudes.

Fig. 4. Maxima of the horizontal gradient of the Bouguer anomaly and its upward continuation to different heights superimposed on the horizontal gradient.

des directions entre $N110$ et 160 . Ces résultats corroborent ceux des études structurales classiques sur le Maroc nord-oriental ([7] et références citées), et témoignent ainsi de l'efficacité de la méthode gravimétrique dans ce genre d'étude. La Fig. 5 montre aussi, en points noirs, les accidents qui subsistent sur la carte prolongée vers le haut de 1 km et qui devraient en principe être profonds. Ainsi on peut signaler la présence : (1) de quatre accidents, de directions NE–SW à ENE–WSW, qui délimitent, du sud vers le nord, le massif

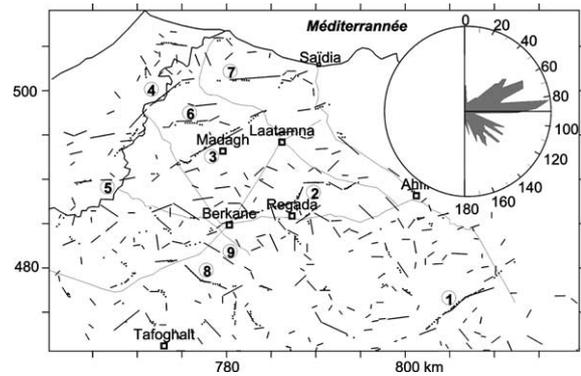


Fig. 5. Tracé et rosace des failles obtenues sur la Fig. 4; en points noirs, les maxima du gradient horizontal déterminés sur la carte prolongée à 1 km vers le haut.

Fig. 5. Faults interpreted from Fig. 4 and their distribution (inset). Black dots show maxima of horizontal gradient of the Bouguer anomaly upward continued to 1 km. Numbers refer to features mentioned in the text.

des Béni-Snassen (n^{os} 1 et 2), la cuvette de Madagh (n^{o} 3) et la partie nord, située entre Madagh et l'oued Moulouya (n^{o} 4); (2) d'accidents est–ouest (n^{os} 5, 6 et 7), (3) d'accidents de direction NW–SE au niveau du massif des Béni-Snassen (n^{os} 8 et 9).

De point de vue hydrogéologique, les résultats obtenus sur la structure de la zone d'étude permettent d'expliquer les faits suivants : (1) le changement du sens d'écoulement de la nappe phréatique des Triffa de nord–sud à SE–NW en s'approchant de l'accident de Madagh–Laalamna (n^{o} 3), (2) la forte minéralisation des eaux souterraines de la partie située au nord de cet accident (bassin B2); ces fortes concentrations seraient dues à la faible dilution par des eaux moins minéralisées et au contact des marnes du Pliocène, qui affleurent au niveau des collines de Oulad Mansour.

6. Conclusion

Cette étude montre l'intérêt des filtrages gravimétriques dans les études structurales. Ainsi, ils ont permis de préciser la structure de la zone d'étude, de mettre en évidence le système de failles qui l'affecte et la présence de deux autres petits bassins dans sa partie nord. Ces résultats ont été confirmés par ceux d'une étude en cours de quatre profils sismiques pétroliers. La carte structurale établie constitue un support primordial pour toute investigation hydrogéolo-

gique dans la région. Les résultats de cette étude montrent également l'intérêt de la ré-exploitation des anciennes campagnes géophysiques à caractère minier ou de simple reconnaissance, en les valorisant dans des études ayant d'autres objectifs, en particulier dans la recherche des eaux souterraines.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au soutien du comité mixte franco-marocain, Action intégrée MA/02/45.

Références

- [1] N. Archibald, P. Gow, F. Bochetti, Multiscale edge analysis of potential field data, *Explor. Geophys.* 30 (1999) 38–44.
- [2] R.J. Blakely, R.W. Simpson, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics* 51 (1986) 1494–1498.
- [3] P. Carlier, Ressources en eau du Maroc, tome 1 : Domaine du Rif et du Maroc oriental, *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 231 (1991) 1.
- [4] L. Cordell, V.J.S. Grauch, Mapping basement magnetic zones from aeromagnetic data in San Juan Basin, New Mexico, in : *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*, SEG Publication, 1982, pp. 181–197.
- [5] A. El Mandour, M. Boughriba, D. Khattach, R. Sadki, Identification et structures des aquifères superficiels et profonds de la plaine des Triffa (Nord-Est du Maroc), *Mines. Géologie & Energie*, Rabat 57 (1998) 179–182.
- [6] A.B. Reid, J.M. Allsop, H. Granser, A.J. Millett, I.W. Somerton, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics* 55 (1990) 80–91.
- [7] H. Tabyaoui, Apport des données à la cartographie des structures géologiques du Maroc nord-oriental. Tectonique cassante, cinématique et contexte géodynamique du Trias à l'Actuel, thèse, université Mohamed-V, Rabat, 2000, 306 p.